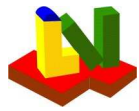


## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Ermittlung von Wärmeverlusten an Tanks .....	2
Stoffwerte von technischen Wärmeträgerölen .....	4
Stoffwerte Gasraum .....	5
Wärmeübergang aussen, Dach .....	6
Wärmeübergang aussen, Mantel .....	8
Wärmeübergang innen, Boden .....	10
Wärmeübergang innen, benetzter Mantel .....	12
Wärmeübergang innen, trockener Mantel .....	14
Wärmeübergang innen, Dach .....	16

### Darstellung

Eingabewerte:	1.234	oder	1.234
Berechnete Werte:	<b>1.234</b>	oder	<b>1.234</b>
Kritische Werte:	<b>1.234</b>	oder	<b>1.234</b>
Schätzwerte:	1.234	oder	1.234



## Ermittlung von Wärmeverlusten an Tanks

### Randbedingungen

Produkt-Temperatur	tP	70	°C
Tank-Innendruck	pi	1	bar
Luft-Temperatur	tL	-5	°C
Windgeschwindigkeit	Wv	5	m/s
Boden-Temperatur	tB	0	°C

### Tankgeometrie

Grundrissform	Runder Grundriss		
Durchmesser	DT	16000	mm
Umfang		50265	mm
Grundfläche		201.1	m <sup>2</sup>
Tankhöhe	HT	8000	mm
Füllhöhe	HF	6000	mm

### Stoffwerte

#### Flüssigkeit

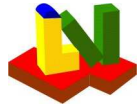
Dichte	$\rho$	855.5	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	cp	2070	J/(kg·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	7.982	mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	0.000009	m <sup>2</sup> /s
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.1235	W/(m·K)
Ausdehnungskoeffizient	$\beta$	0.000833	1/K

#### Gas

Mediumsbezeichnung	Luft		
Dichte	$\rho$	1.015	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	cp	1009	J/(kg·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	0.02056	mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	0.000020	m <sup>2</sup> /s
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.02952	W/(m·K)
Ausdehnungskoeffizient	$\beta$	0.002919	1/K

### Boden

Dicke der Wand	siB	6	mm
Wärmeleitfähigkeit der Wand	$\lambda_{iB}$	52	W/(m·K)
Wärmewiderstand der Wand (s/ $\lambda$ )	$\beta_{iB}$	0.000115	m <sup>2</sup> ·K/W
Dicke der Isolation	saB	100	mm
Wärmeleitfähigkeit der Isolation	$\lambda_{aB}$	0.04	W/(m·K)
Wärmewiderstand der Isolation (s/ $\lambda$ )	$\beta_{aB}$	2.5	m <sup>2</sup> ·K/W
Wärmeübergangskoeffizient außen	$\alpha_{aB}$	5	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Wärmeübergangskoeffizient innen	$\alpha_{iB}$	48.51	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Austauschfläche	AB =	201.1	m <sup>2</sup>
Grenz-Temperatur (Wand-Isolierung)	tgB =	71.53	°C
Temperatur innen	tiB =	71.52	°C
Temperatur außen	taB =	5.299	°C
Heizleistung	QhB	20200	W
Wärmestrom von innen	QiB =	-14.87	kW
Wärmestrom nach außen	QaB =	5.327	kW



### Mantel

Dicke der Wand	$s_{iM}$	6	mm
Wärmeleitfähigkeit der Wand	$\lambda_{iM}$	52	W/(m·K)
Wärmewiderstand der Wand ( $s/\lambda$ )	$\beta_{iM}$	<b>0.000115</b>	m <sup>2</sup> ·K/W
Dicke der Isolation	$s_{aM}$	100	mm
Wärmeleitfähigkeit der Isolation	$\lambda_{aM}$	0.04	W/(m·K)
Wärmewiderstand der Isolation ( $s/\lambda$ )	$\beta_{aM}$	<b>2.5</b>	m <sup>2</sup> ·K/W
Wärmeübergangskoeffizient außen	$\alpha_{aM}$	<b>19.57</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)

### benetzter Anteil

Wärmeübergangskoeffizient innen	$\alpha_{iMb}$	<b>39.4</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Austauschfläche	$A_{Mb}$ =	<b>301.6</b>	m <sup>2</sup>
Grenz-Temperatur (Wand-Isolierung)	$t_{gMb}$ =	<b>69.26</b>	°C
Temperatur innen	$t_{iMb}$ =	<b>69.26</b>	°C
Temperatur außen	$t_{aMb}$ =	<b>-3.513</b>	°C
Heizleistung	$Q_{hMb}$	0	kW
Wärmestrom von innen	$Q_{iMb}$ =	<b>8.779</b>	kW
Wärmestrom nach außen	$Q_{aMb}$ =	<b>8.779</b>	kW

### trockener Anteil

Wärmeübergangskoeffizient innen	$\alpha_{iMt}$	<b>2.722</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Austauschfläche	$A_{Mt}$ =	<b>100.5</b>	m <sup>2</sup>
Grenz-Temperatur (Wand-Isolierung)	$t_{gMt}$ =	<b>60.56</b>	°C
Temperatur innen	$t_{iMt}$ =	<b>60.56</b>	°C
Temperatur außen	$t_{aMt}$ =	<b>-3.687</b>	°C
Heizleistung	$Q_{hMt}$	0	kW
Wärmestrom von innen	$Q_{iMt}$ =	<b>2.583</b>	kW
Wärmestrom nach außen	$Q_{aMt}$ =	<b>2.583</b>	kW

### Dach

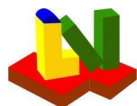
Dicke der Wand	$s_{iD}$	6	mm
Wärmeleitfähigkeit der Wand	$\lambda_{iD}$	52	W/(m·K)
Wärmewiderstand der Wand ( $s/\lambda$ )	$\beta_{iD}$	<b>0.000115</b>	m <sup>2</sup> ·K/W
Dicke der Isolation	$s_{aD}$	100	mm
Wärmeleitfähigkeit der Isolation	$\lambda_{aD}$	0.04	W/(m·K)
Wärmewiderstand der Isolation ( $s/\lambda$ )	$\beta_{aD}$	<b>2.5</b>	m <sup>2</sup> ·K/W
Wärmeübergangskoeffizient außen	$\alpha_{aD}$	<b>10.45</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Wärmeübergangskoeffizient innen	$\alpha_{iD}$	<b>0.5624</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Austauschfläche	$A_D$ =	<b>201.1</b>	m <sup>2</sup>
Grenz-Temperatur (Wand-Isolierung)	$t_{gD}$ =	<b>39.51</b>	°C
Temperatur innen	$t_{iD}$ =	<b>39.51</b>	°C
Temperatur außen	$t_{aD}$ =	<b>-3.36</b>	°C
Heizleistung	$Q_{hD}$	0	kW
Wärmestrom von innen	$Q_{iD}$ =	<b>3.448</b>	kW
Wärmestrom nach außen	$Q_{aD}$ =	<b>3.448</b>	kW

### Bilanz

Heizleistung	$Q_{h\_ges}$ =	<b>20.2</b>	kW
Wärmestrom von innen	$Q_{i\_ges}$ =	<b>-0.06328</b>	kW
Wärmestrom nach außen	$Q_{a\_ges}$ =	<b>20.14</b>	kW

### Beheizung

Temperatur des Heizmediums am Eintritt	120.1	°C
Temperatur des Heizmediums am Austritt	119.9	°C
Erforderlicher k-Wert bei äußerer Mantelbeheizung	<b>0</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Erforderlicher k-Wert bei äußerer Bodenbeheizung	<b>2.041</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)



## Stoffwerte von technischen Wärmeträgerölen

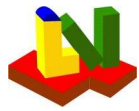
Name des Wärmeträgeröls **Marlotherm N**  
 Stoffstruktur Alkylsubstituierte aromatische CH-Verbindungen  
 Hersteller SASOL Germany  
 Bemerkung  
 Einsatzmöglichkeit A

Temperatur	Zustand 1		Zustand 2	
	70 °C		°C	
Dichte	$\rho$	<b>855.5</b> kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	<b>2070</b> J/(kg·K)	$c_p$	J/(kg·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	<b>7.982</b> mPa·s	$\eta$	mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	<b>0.000009</b> m <sup>2</sup> /s	$\nu$	m <sup>2</sup> /s
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	<b>0.1235</b> W/(m·K)	$\lambda$	W/(m·K)
Therm. Ausdehnungskoeff.	$\beta$	<b>0.000833</b> 1/K	$\beta$	1/K
Temperaturleitfähigkeit	$a$	<b>6.977E-8</b> m <sup>2</sup> /s	$a$	m <sup>2</sup> /s
Prandtl-Zahl	Pr	<b>132.2</b> -	Pr	-
Spezifische Enthalpie	$h$	<b>0</b> kJ/kg	$h$	kJ/kg
Dampfdruck	$p_D$	<b>0</b> Pa	$p_D$	Pa

Fließgrenze des Wärmeträgeröls -60 °C  
 Siedebeginn des Wärmeträgeröls 340 °C  
 Minimale Einsatztemperatur -10 °C  
 Maximale Einsatztemperatur 300 °C

Minimale Temperatur Füllen -10 °C  
 Minimale Temperatur Anfahren 70 °C  
 Maximale Filmtemperatur 330 °C  
 Flammpunkt 180 °C  
 Zündtemperatur 330 °C  
 Neutralisationszahl 0.05 mgKOH/g  
 Koksrückstand 0.03 %  
 Explosionsgrenze Vol-%  
 Molmasse des Wärmeträgeröls 320 kg/kmol

Temperatur	$\vartheta_{\min}$		$\vartheta_{\max}$	
	Dichte	$\rho$	897 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	1860 J/(kg·K)	$c_p$	3150 J/(kg·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	258 mPa·s	$\eta$	0.37 mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	0.00035 m <sup>2</sup> /s	$\nu$	5.7E-07 m <sup>2</sup> /s
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.137 W/(m·K)	$\lambda$	0.126 W/(m·K)
Dampfdruck	$p_D$	Pa	$p_D$	20000 Pa



## Stoffwerte Gasraum

### Stoffwerte von Luft

	Zustand 1			Zustand 2		
Temperatur	$\vartheta_1$	70	°C	$\vartheta_2$		°C
Druck	$p_1$	1	bar	$p_2$		Pa
Dichte	$\rho$	<b>1.015</b>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho$		kg/m <sup>3</sup>
Spez. Wärmekapazität	$c_p$	<b>1009</b>	J/(kg·K)	$c_p$		J/(kg·K)
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	<b>0.02952</b>	W/(m·K)	$\lambda$		W/(m·K)
Dynamische Viskosität	$\eta$	<b>0.02056</b>	mPa·s	$\eta$		mPa·s
Kinematische Viskosität	$\nu$	<b>0.000020</b>	m <sup>2</sup> /s	$\nu$		m <sup>2</sup> /s
Spezifische Enthalpie	$h$	<b>45345</b>	J/kg	$h$		J/kg
Prandtl-Zahl	$Pr$	<b>0.7026</b>	-	$Pr$		-
Realgasfaktor	$Z$	<b>1</b>	-	$Z$		-
Spezifische Entropie	$s$	<b>145.4</b>	J/(kg·K)	$s$		J/(kg·K)
Temperaturleitfähigkeit	$a$	<b>0.000029</b>	m <sup>2</sup> /s	$a$		m <sup>2</sup> /s
Wärmeausdehnungskoeff.	$\beta$	<b>0.002919</b>	1/K	$\beta$		1/K
Schallgeschwindigkeit	$w_s$	<b>371.4</b>	m/s	$w_s$		m/s

Molmasse	$M$	28.96	g/mol
Gaskonstante	$R$	287.1	J/(kg·K)
Normdichte	$\rho_N$	1.293	kg/m <sup>3</sup>

#### Kritische Daten

Kritische Temperatur	$T_c$	-140.6	°C
Kritischer Druck	$p_c$	3786000	Pa
Kritische Dichte	$\rho_c$	342.6	kg/m <sup>3</sup>

#### Gültigkeitsbereiche:

$$-150 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 1000 \text{ °C}$$

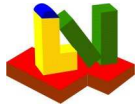
$$1 \text{ bar} \leq p \leq 1000 \text{ bar}$$

#### Zusammensetzung der Luft:

	Mol-%	Gew-%
N <sub>2</sub> :	78.12	75.570
O <sub>2</sub> :	20.96	23.161
A <sub>r</sub> :	0.92	1.269

#### Normierung der Enthalpie und Entropie:

$h = 0 \text{ kJ/kg}$ ,  $s = 0 \text{ kJ/(kg·K)}$  bei  $T = 298.15 \text{ K} = 25\text{°C}$ ,  $p = 1.01325 \text{ bar}$   
für die reinen Komponenten



## Wärmeübergang aussen, Dach

### Wärmeübertragung bei der Strömung längs einer ebenen Wand

---

#### Geometrie:

Beheizte Plattenlänge	l	16000	mm
Strömungsgeschwindigkeit	w	5	m/s

---

#### Stoffwerte:

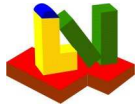
Mittlerer Druck	p	100000	Pa
Mittlere Temperatur	$\vartheta$	-5	°C
→ Dichte	$\rho$	1.015	kg/m <sup>3</sup>
→ Spezifische Wärmekapazität	C <sub>p</sub>	1009	J/(kg·K)
→ Spezifische Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.02952	W/(m·K)
→ Dynamische Viskosität	$\eta$	0.02056	mPa·s
→ Kinematische Viskosität	$\nu$	0.000020	m <sup>2</sup> /s
→ Prandtl-Zahl	Pr	0.7026	-
Mittlere Wandtemperatur	$\vartheta_w$	39.51	°C
→ Prandtl-Zahl bei Wandtemperatur	Pr <sub>w</sub>	0.7026	-
Phase (Flüssigkeit = 1 / Gas = 2)		2	
Exponent für Flüssigkeiten	n <sub>F</sub>	0.25	-
Exponent für Gase	n <sub>G</sub>	0	-

---

#### Wärmeübergang:

Reynolds-Zahl	Re	=	3949840	-	
Nusselt-Zahl laminar	Nu <sub>lam</sub>	=	1173	-	(1)
Nusselt-Zahl turbulent	Nu <sub>turb</sub>	=	5544	-	(2)
Nusselt-Zahl gemittelt	Nu <sub>1,0</sub>	=	5667	-	(5)
Nusselt-Zahl mit Wandkorrektur	Nu	=	5667	-	(6)
Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$	=	10.45	W/(m <sup>2</sup> ·K)	

---



**Gleichungen:**

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad \Leftrightarrow \quad 5667 = \frac{10.45 \cdot 16}{0.02952}$$

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad \Leftrightarrow \quad 3949840 = \frac{5 \cdot 16}{0.000020}$$

$$Nu = Nu_0 \cdot K \quad \Leftrightarrow \quad 5667 = 5667 \cdot 1 \quad (6)$$

$$Nu_{1,0} = \sqrt{Nu_{1,am}^2 + Nu_{turb}^2} \quad \Leftrightarrow \quad (5)$$

$$5667 = \sqrt{1173^2 + 5544^2}$$

$$Nu_{1,am} = 0.664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad \Leftrightarrow \quad (1)$$

$$1173 = 0.664 \cdot \sqrt{3949840} \cdot \sqrt[3]{0.7026}$$

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad \Leftrightarrow \quad (2)$$

$$5544 = \frac{0.037 \cdot 3949840^{0.8} \cdot 0.7026}{1 + 2.443 \cdot 3949840^{-0.1} \cdot (0.7026^{2/3} - 1)}$$

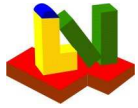
**Einfluß der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte:**

Flüssigkeiten:

$$K_F = (Pr / Pr_w)^{n_F} \quad \Leftrightarrow \quad 1 = (0.7026 / 0.7026)^{0.25}$$

Gase:

$$K_G = (T / T_w)^{n_G} \quad \Leftrightarrow \quad 1 = (268.2 / 312.7)^0$$



## Wärmeübergang aussen, Mantel

### Wärmeverlust von Wänden und Rohrleitungen

#### Wärmeverlust von isolierten Rohrleitungen (freiliegend)

**Parameter:**

Temperatur Medium innen	$\vartheta_i$	70	°C
Lufttemperatur	$\vartheta_a$	-5	°C
Innendurchmesser des Rohres	$d_1$	16000	mm
Innerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_i$	39.4	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Windgeschwindigkeit	w	5	m/s

**Wärmedurchgang:**

	Wanddicke		Wärmeleitfähigkeit	
Rohr	$s_1$	6 mm	$\lambda_1$	52 W/(m·K)
Isolation 1	$s_2$	100 mm	$\lambda_2$	0.04 W/(m·K)
Isolation 2	$s_3$	0 mm	$\lambda_3$	1 W/(m·K)

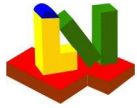
**Berechnung:**

Schichtdurchmesser	$d_2$	<b>16012</b>	mm
Schichtdurchmesser	$d_3$	<b>16212</b>	mm
Außendurchmesser des Rohres	$d_4$	<b>16212</b>	mm
Temperaturdifferenz	$ \vartheta_i - \vartheta_a $	<b>75</b>	°C
Hilfsvariable	D	<b>2.541</b>	m <sup>2</sup> ·K/W
Äußerer Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_a$	<b>19.57</b>	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Wärmeverlust pro Längeneinheit	Q/l	<b>-1473</b>	W/m

Rohrlänge	l		mm
Wärmeverlust gesamt	Q		kW

**Temperaturen:**

Temperatur Medium innen	$\vartheta_i$	70	°C
Rohrwandtemperatur innen	$\vartheta_{wi}$	<b>69.26</b>	°C
Rohrwandtemperatur aussen	$\vartheta_{wa}$	<b>69.25</b>	°C
Isolation	$\vartheta_{iso}$	<b>-3.522</b>	°C
Oberflächentemperatur	$\vartheta_o$	<b>-3.522</b>	°C
Lufttemperatur	$\vartheta_a$	-5	°C



Gleichungen:

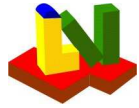
$$\begin{aligned}
 D &= d_4 \cdot \left[ \frac{1}{\alpha_i \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right] \\
 &= 16.21 \left[ \frac{1}{39.4} + \frac{1}{2 \cdot 16} \ln \frac{16.01}{16} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2 \cdot 0.04} \ln \frac{16.21}{16.01} + \frac{1}{2 \cdot 1} \ln \frac{16.21}{16.21} \right] = 2.541 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}
 \end{aligned}$$

Für ruhende Luft ( $w=0$ ) gilt:

$$\begin{aligned}
 \alpha_a &= 8 + 0.04 \cdot |v_0 - v_a| \\
 &= 8 + 0.04 \cdot |-3.522 - (-5)| = 8.059 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})
 \end{aligned}$$

Für Wind folgt :  $1/\alpha_a = 0.0511 = f(5 ; 16.21)$

$$\begin{aligned}
 Q/l &= \frac{d_4 \cdot \pi \cdot (v_i - v_a)}{D + 1 / \alpha_a} \\
 &= \frac{16.21 \cdot \pi \cdot (70 - (-5))}{2.541 + 1 / 19.57} = -1473 \text{ W/m}
 \end{aligned}$$



## Wärmeübergang innen, Boden

### Wärmeübertragung durch freie Konvektion an umströmten Körpern

#### 4. Horizontale ebene Flächen (Wärmeabgabe auf der Oberseite)

##### Randbedingungen:

Oberfläche des umströmten Körpers	A	201.1	m <sup>2</sup>	
Umfang der Projektionsfläche	U	50265	mm	
Anströmlänge	l =	4000	mm	(11)
Erdbeschleunigung	g	9.81	m/s <sup>2</sup>	
Temperatur an der Oberfläche	$\vartheta_0$	71.52	°C	
Temperatur im Fluid außerhalb Grenzschicht	$\vartheta_\infty$	70	°C	
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta$ =	1.525	K	

##### Stoffwerte:

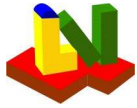
Mittlere Temperatur	$\vartheta_m$ =	70.76	°C	
→ Dichte	$\rho$	855.5	kg/m <sup>3</sup>	
→ Spezifische Wärmekapazität	cp	2070	J/(kg·K)	
→ Dynamische Viskosität	$\eta$	7.982	mPa·s	
→ Kinematische Viskosität	$\nu$ =	0.000009	m <sup>2</sup> /s	
→ Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.1235	W/(m·K)	
→ Ausdehnungskoeffizient	$\beta$	0.000833	1/K	

##### Kennzahlen:

Prandtl-Zahl	Pr =	133.8	-	
Grashof-Zahl	Gr =	9.163E+9	-	(3)
Rayleigh-Zahl	Ra =	1.23E+12	-	(4)
Prandtl-Funktion	$f_2(Pr)$ =	0.9372	-	(20)
Nusselt-Zahl laminar	Nu <sub>l</sub> =	197.8	-	(18)
Nusselt-Zahl turbulent	Nu <sub>t</sub> =	1571	-	(19)
Nusselt-Zahl	Nu =	1571	-	

##### Wärmeübergang:

Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$ =	48.51	W/(m <sup>2</sup> ·K)	(2)
Austauschfläche	A	201.1	m <sup>2</sup>	
Konvektiver Wärmestrom	Q =	14.87	kW	



Gleichungen:

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / l \quad (2)$$
$$48.51 = 1571 \cdot 0.1235 / 4$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta \quad \Leftrightarrow \quad (3)$$
$$9.163\text{E}+9 = \frac{9.81 \cdot 4^3}{0.000009^2} \cdot 0.000833 \cdot 1.525$$

$$\text{Ra} = \frac{\text{Gr}}{\nu} \cdot \text{Pr} \quad (4)$$
$$1.23\text{E}+12 = 9.163\text{E}+9 \cdot 133.8$$

$$l = \frac{A}{U} \quad (11)$$
$$4 = 201.1 / 50.27$$

$$\text{Nu}_l = 0.766 \cdot \left[ \text{Ra} \cdot f_2(\text{Pr}) \right]^{1/5} \quad (18)$$

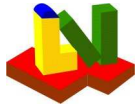
$$197.8 = 0.766 \cdot \left[ 1.23\text{E}+12 \cdot 0.9372 \right]^{1/5}$$

$$\text{Nu}_t = 0.15 \cdot \left[ \text{Ra} \cdot f_2(\text{Pr}) \right]^{1/3} \quad (19)$$

$$1571 = 0.15 \cdot \left[ 1.23\text{E}+12 \cdot 0.9372 \right]^{1/3}$$

$$f_2(\text{Pr}) = \left[ 1 + \left[ 0.322 / \text{Pr} \right]^{11/20} \right]^{-20/11} \quad (20)$$

$$0.9372 = \left[ 1 + \left[ 0.322 / 133.8 \right]^{11/20} \right]^{-20/11}$$



## Wärmeübergang innen, benetzter Mantel

### Wärmeübertragung durch freie Konvektion an umströmten Körpern

#### 2. Vertikale Flächen (Zylinder)

##### Randbedingungen:

Höhe des Zylinders	h	6000	mm
Durchmesser des Zylinders	D	16000	mm
Anströmlänge	l =	6000	mm
Erdbeschleunigung	g	9.81	m/s <sup>2</sup>
Temperatur an der Oberfläche	$\vartheta_0$	69.26	°C
Temperatur im Fluid außerhalb Grenzschicht	$\vartheta_\infty$	70	°C
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta$ =	0.7388	K

##### Stoffwerte:

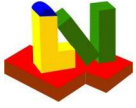
Mittlere Temperatur	$\vartheta_m$ =	69.63	°C
→ Dichte	$\rho$	855.5	kg/m <sup>3</sup>
→ Spezifische Wärmekapazität	cp	2070	J/(kg·K)
→ Dynamische Viskosität	$\eta$	7.982	mPa·s
→ Kinematische Viskosität	$\nu$ =	0.000009	m <sup>2</sup> /s
→ Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.1235	W/(m·K)
→ Ausdehnungskoeffizient	$\beta$	0.000833	1/K

##### Kennzahlen:

Prandtl-Zahl	Pr =	133.8	-
Grashof-Zahl	Gr =	1.50E+10	(3)
Rayleigh-Zahl	Ra =	2.00E+12	(4)
Prandtl-Funktion	$f_1(\text{Pr})$ =	0.9283	(13)
Nusselt-Zahl für Platte	Nu_P =	1914	(12)
Nusselt-Zahl	Nu =	1914	(14)

##### Wärmeübergang:

Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$ =	39.4	W/(m <sup>2</sup> ·K) (2)
Austauschfläche	A =	301.6	m <sup>2</sup>
Konvektiver Wärmestrom	Q =	8.779	kW



**Gleichungen:**

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / l \quad (2)$$

$$39.4 = 1914 \cdot 0.1235 / 6$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta \quad \Leftrightarrow \quad (3)$$

$$1.50\text{E}+10 = \frac{9.81 \cdot 6^3}{0.000009^2} \cdot 0.000833 \cdot 0.7388$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (4)$$

$$2.00\text{E}+12 = 1.50\text{E}+10 \cdot 133.8$$

$$\text{Nu}_P = \left[ 0.825 + 0.387 \cdot \left[ \text{Ra} \cdot f_1(\text{Pr}) \right]^{1/6} \right]^2 \quad (12)$$

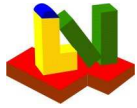
$$1914 = \left[ 0.825 + 0.387 \cdot \left[ 2.00\text{E}+12 \cdot 0.9283 \right]^{1/6} \right]^2$$

$$f_1(\text{Pr}) = \left[ 1 + \left[ 0.492 / \text{Pr} \right]^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (13)$$

$$0.9283 = \left[ 1 + \left[ 0.492 / 133.8 \right]^{9/16} \right]^{-16/9}$$

$$\text{Nu} = \text{Nu}_P + 0.87 \cdot \frac{h}{6} / \frac{D}{16} \quad (14)$$

$$1914 = 1914 + 0.87 \cdot \frac{h}{6} / \frac{D}{16}$$



## Wärmeübergang innen, trockener Mantel

### Wärmeübertragung durch freie Konvektion an umströmten Körpern

#### 2. Vertikale Flächen (Zylinder)

##### Randbedingungen:

Höhe des Zylinders	h	2000	mm
Durchmesser des Zylinders	D	16000	mm
Anströmlänge	l =	2000	mm
Erdbeschleunigung	g	9.81	m/s <sup>2</sup>
Temperatur an der Oberfläche	$\vartheta_0$	60.56	°C
Temperatur im Fluid außerhalb Grenzschicht	$\vartheta_\infty$	70	°C
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta$ =	9.441	K

##### Stoffwerte:

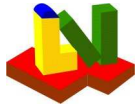
Mittlere Temperatur	$\vartheta_m$ =	65.28	°C
→ Dichte	$\rho$	1.015	kg/m <sup>3</sup>
→ Spezifische Wärmekapazität	c <sub>p</sub>	1009	J/(kg·K)
→ Dynamische Viskosität	$\eta$	0.02056	mPa·s
→ Kinematische Viskosität	$\nu$ =	0.000020	m <sup>2</sup> /s
→ Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.02952	W/(m·K)
→ Ausdehnungskoeffizient	$\beta$	0.002919	1/K

##### Kennzahlen:

Prandtl-Zahl	Pr =	0.7026	-
Grashof-Zahl	Gr =	5.272E+9	(3)
Rayleigh-Zahl	Ra =	3.704E+9	(4)
Prandtl-Funktion	$f_1(\text{Pr})$ =	0.3454	(13)
Nusselt-Zahl für Platte	Nu <sub>P</sub> =	184.3	(12)
Nusselt-Zahl	Nu =	184.4	(14)

##### Wärmeübergang:

Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$ =	2.722	W/(m <sup>2</sup> ·K) (2)
Austauschfläche	A =	100.5	m <sup>2</sup>
Konvektiver Wärmestrom	Q =	2.583	kW



**Gleichungen:**

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / l \quad (2)$$

$$2.722 = 184.4 \cdot 0.02952 / 2$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta \quad \Leftrightarrow \quad (3)$$

$$5.272\text{E}+9 = \frac{9.81 \cdot 2^3}{0.000020^2} \cdot 0.002919 \cdot 9.441$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (4)$$

$$3.704\text{E}+9 = 5.272\text{E}+9 \cdot 0.7026$$

$$\text{Nu}_P = \left[ 0.825 + 0.387 \cdot \left[ \text{Ra} \cdot f_1(\text{Pr}) \right]^{1/6} \right]^2 \quad (12)$$

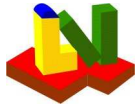
$$184.3 = \left[ 0.825 + 0.387 \cdot \left[ 3.704\text{E}+9 \cdot 0.3454 \right]^{1/6} \right]^2$$

$$f_1(\text{Pr}) = \left[ 1 + \left[ 0.492 / \text{Pr} \right]^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (13)$$

$$0.3454 = \left[ 1 + \left[ 0.492 / 0.7026 \right]^{9/16} \right]^{-16/9}$$

$$\text{Nu} = \frac{\text{Nu}_P + 0.87 \cdot h}{2} \cdot D \quad (14)$$

$$184.4 = \frac{184.3 + 0.87 \cdot 16}{2}$$



## Wärmeübergang innen, Dach

### Wärmeübertragung durch freie Konvektion an umströmten Körpern

#### 4. Horizontale ebene Flächen (Wärmeabgabe auf der Unterseite)

##### Randbedingungen:

Oberfläche des umströmten Körpers	A	201.1	m <sup>2</sup>	
Umfang der Projektionsfläche	U	50265	mm	
Anströmlänge	l =	4000	mm	(11)
Erdbeschleunigung	g	9.81	m/s <sup>2</sup>	
Temperatur an der Oberfläche	$\vartheta_0$	39.51	°C	
Temperatur im Fluid außerhalb Grenzschicht	$\vartheta_\infty$	70	°C	
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta$ =	30.49	K	

##### Stoffwerte:

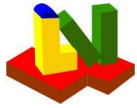
Mittlere Temperatur	$\vartheta_m$ =	54.75	°C	
→ Dichte	$\rho$	1.015	kg/m <sup>3</sup>	
→ Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	1009	J/(kg·K)	
→ Dynamische Viskosität	$\eta$	0.02056	mPa·s	
→ Kinematische Viskosität	$\nu$ =	0.000020	m <sup>2</sup> /s	
→ Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	0.02952	W/(m·K)	
→ Ausdehnungskoeffizient	$\beta$	0.002919	1/K	

##### Kennzahlen:

Prandtl-Zahl	Pr =	0.7026	-	
Grashof-Zahl	Gr =	1.36E+11	-	(3)
Rayleigh-Zahl	Ra =	9.57E+10	-	(4)
Prandtl-Funktion	$f_1(\text{Pr})$ =	0.3454	-	(13)
Nusselt-Zahl	Nu =	76.21	-	(21)

##### Wärmeübergang:

Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$ =	0.5624	W/(m <sup>2</sup> ·K)	(2)
Austauschfläche	A	201.1	m <sup>2</sup>	
Konvektiver Wärmestrom	Q =	3.448	kW	



Gleichungen:

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / l \quad (2)$$
$$0.5624 = 76.21 \cdot 0.02952 / 4$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta \quad \Leftrightarrow \quad (3)$$
$$1.36\text{E}+11 = \frac{9.81 \cdot 4^3}{0.000020^2} \cdot 0.002919 \cdot 30.49$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \quad (4)$$
$$9.57\text{E}+10 = 1.36\text{E}+11 \cdot 0.7026$$

$$l = A / U \quad (11)$$
$$4 = 201.1 / 50.27$$

$$f_1(\text{Pr}) = \left[ 1 + \left[ 0.492 / \text{Pr} \right]^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (13)$$

$$0.3454 = \left[ 1 + \left[ 0.492 / 0.7026 \right]^{9/16} \right]^{-16/9}$$

$$\text{Nu} = 0.6 \cdot \left[ \text{Ra} \cdot f_1(\text{Pr}) \right]^{1/5} \quad (21)$$

$$76.21 = 0.6 \cdot \left[ 9.57\text{E}+10 \cdot 0.3454 \right]^{1/5}$$